RELACIONES MORFOMETRÍA – RESPUESTA HIDROLÓGICA EN LA MICROCUENCA DE DRENAJE DE LA QUEBRADA CURUCUTÍ (ESTADO VARGAS, VENEZUELA), Y SU APLICACIÓN EN LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES

Williams José MÉNDEZ MATA[1]
José Rafael CÓRDOVA[2]
Scarlet Josefina CARTAYA RÍOS[3]

RESUMEN

La microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí se ubica en la vertiente norte del Macizo del Ávila (10º33'08"-10º36'23" LN y 66º57'38"-66º59'14" LO), en el sector centro occidental del estado Vargas (Venezuela). Este pequeño sistema fue una de las más de veinte cuencas que se activaron hidromorfodinámicamente, como respuesta a las excepcionales precipitaciones ocurridas en Diciembre de 1999, en el Litoral Central de Venezuela. Es por ello que el propósito de este trabajo es, analizar e interpretar la dinámica hidrogeomorfológica de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, en términos del control que ejercen sus parámetros morfométricos en las características de la respuesta hidrológica.

La metodología comprendió: (a) Cálculos y mediciones de parámetros morfométricos de la microcuenca y de su red de drenaje, con apoyo en cartas topográficas del área a escalas 1:5.000 y 1:10.000, y ortofotomapa a escala 1:25.000; (b) cálculo del tiempo de concentración de la microcuenca, y de la velocidad media del flujo; y (c) estimación de los hidrogramas unitarios y caudales pico de crecientes. También se realizó un trabajo de campo, para medir el ancho de la sección hidráulica de interés (ápice del abanico).

La microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, es un sistema hidrogeomorfológico cuya respuesta hidrológica está determinada por la pequeña área del mismo, fuertes pendientes en las vertientes y cauces del sector montañoso, la densidad de drenaje media, el orden 5 de la microcuenca, una relación de bifurcación media de 3,73, alta torrencialidad, las dimensiones de las tormentas y la intensidad y duración de las lluvias. En breves palabras, la respuesta hidrológica de la microcuenca, es condicionada y controlada por las características morfométricas del sistema y de su red de drenaje.

Los cortos tiempos de concentración, así como las magnitudes estimadas de los caudales pico de crecientes y los picos y tiempos al pico de los hidrogramas unitarios obtenidos, corroboran la influencia que ejercen las características fisiográficas de la microcuenca y la estructura de la red de drenaje, en las respuestas rápidas y violentas del sistema. Ello definen escenarios críticos de inundaciones, para eventos de períodos de retorno de 50, 100 y 500 años principalmente, y en el peor de los casos de 1000 años.

Este trabajo aporta elementos de gran importancia para la concepción y/o reevaluación de ser el caso, del diseño hidráulico e hidrológico de estructuras para el control de crecientes y

[1] Universidad Pedagógica Experimental Libertador – Instituto Pedagógico de Caracas, Departamento de Ciencias de la Tierra, Núcleo de Investigación "Estudio del Medio Físico Venezolano", Profesor, MSc, williamsmendez@gmail.com
[2] Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Profesor, PhD, jcordova@usb.ve
[3] Universidad Pedagógica Experimental Libertador – Instituto Pedagógico de Caracas, Departamento de Geografía e Historia, Maestría en Geografía Física, Profesora, MSc, scarletcartaya@gmail.com

de sedimentos, así como para el análisis, evaluación y zonificación de la amenaza por inundaciones, y el diseño de sistemas de alertas tempranas.

INTRODUCCIÓN

La microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, fue uno de los más de veinte sistemas que se activaron hidromorfodinámicamente, como respuesta a las excepcionales precipitaciones de Diciembre de 1999, que afectaron principalmente la vertiente norte de la Serranía del Ávila.

El interés en esta microcuenca como área de estudio radica en que en su sector bajo (abanico aluvial) se asienta gran parte de la infraestructura aduanera (almacenes) portuaria y aeroportuaria del país, la cual fue afectada por el evento de 1999; así como una extensión considerable del Aeropuerto Internacional de Maiquetía "Simón Bolívar", y un asentamiento poblacional significativo emplazado en el área del abanico aluvial y vertientes bajas, parcialmente afectado durante el evento de Diciembre de 1999.

El análisis morfométrico de una cuenca de drenaje es de gran importancia para comprender e interpretar su comportamiento morfodinámico e hidrológico, así como para inferir indirecta y cualitativamente la estructura, características y formas de los hidrogramas resultantes de eventos de crecidas (respuesta hidrológica) (ALONSO ET AL., 1981; VÉLEZ; VÉLEZ, s. f.a).

La estructura de la respuesta hidrológica de una cuenca representada por el hidrograma unitario instantáneo, y derivada como una función de los parámetros morfométricos de ella, definen al Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico (HUIG) (RODRÍGUEZ; VALDÉS, 1979; VALDÉS; FIALLO; RODRÍGUEZ, 1979; RODRÍGUEZ; DEVOTO; VALDÉS, 1979; RODRÍGUEZ; GONZÁLEZ, 1982; RODRÍGUEZ; GONZÁLEZ; CAAMAÑO, 1982; CÓRDOVA; RODRÍGUEZ, 1983). Este método es de gran utilidad para la estimación de caudales pico de crecientes en cuencas con información hidrológica escasa o inexistente, ya que a partir de su calibración en una cuenca cercana que posea información de precipitación, puede ser extrapolado y aplicado a cuencas vecinas con características fisiográficas similares.

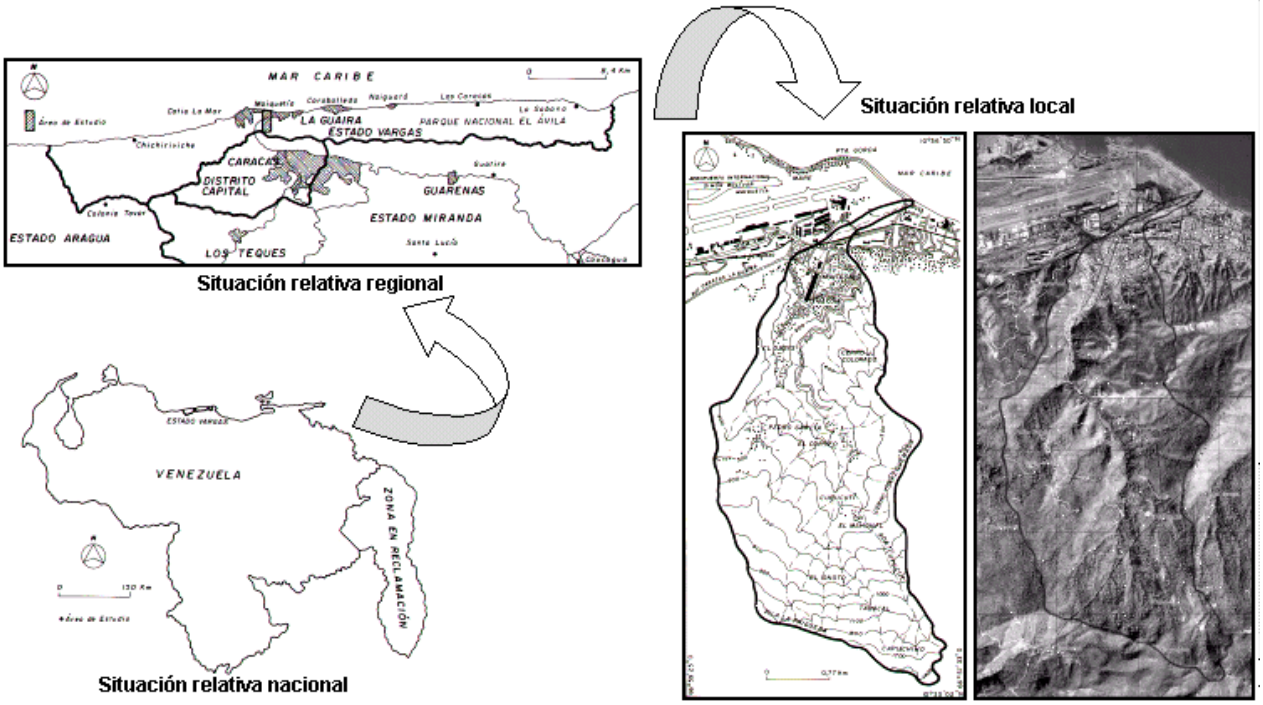
Por ello, en el presente trabajo se midieron y calcularon los parámetros morfométricos de la microcuenca y su red de drenaje, se calcularon los tiempos de concentración, y se estimaron los caudales pico de crecientes por medio del modelo HUIG, con el propósito fundamental de analizar e interpretar la respuesta hidrológica de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, como una función directa de las características morfométricas del sistema y de su red de drenaje, a fin de contribuir con la evaluación de la amenaza por inundaciones en esta área.

ÁREA DE ESTUDIO

La microcuenca de la quebrada Curucutí está situada geográficamente en la Región Centro Norte del territorio venezolano, específicamente en el sector centro occidental del estado Vargas, y definida geoastronómicamente por las siguientes coordenadas: 10º33'08" – 10º36'23" de latitud norte, y 66º57'38" – 66º59'14" de longitud oeste (Figura 1).

La geología está representada fundamentalmente por afloramientos de rocas metamórficas correspondientes a las unidades litodémicas: (a) Complejo San Julián (esquistos y gneises), (b) Esquisto de Tacagua, (c) Mármol de Antímano, (d) cuerpos de serpentinita, y (e) depósitos aluvionales (abanico coluvio-aluvial) de origen fluvio-torrencial (URBANI, 2002; URBANI; RODRÍGUEZ; VIVAS, 2000). Desde el punto de vista orográfico, el área de estudio se ubica en el sector central del Sistema Orográfico Central de Venezuela, en el tramo septentrional conocido como Cordillera de la Costa o Serranía del Litoral, y específicamente emplazada en el extremo occidental de la vertiente norte de la Sierra o Macizo del Ávila.

La microcuenca se comparte entre dos grandes unidades de relieve con topografías contrastantes: (a) un sector montañoso de topografía muy abrupta que abarca la mayor extensión del área, con alturas comprendidas entre 100 msnm y más de 1.400 msnm, y pendientes que oscilan entre 3 % y 45 %; y (b) una unidad de abanico coluvio-aluvial de topografía suave y moderadamente inclinada, emplazado en la parte baja o terminal de la microcuenca, con elevaciones desde 0 msnm en la línea de costa y base del abanico, hasta



125 msnm en el ápice del mismo, y pendientes entre 0 % y 18 % (PROYECTO ÁVILA; MAPA DE RIESGOS, 2002a).

Figura 1. Localización de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, estado Vargas, Venezuela. Base cartográfica tomada de las Hojas Maiquetía (6847-IV-NO) y 23 de Enero (6847-IV-SO) a escala 1:25.000, de la Dirección de Cartografía Nacional, 1979; imagen tomada del Ortofotomapa de la República de Venezuela, Hojas La Guaira (6847-IV-NO) y Caracas (6847-IV-SO) a escala 1:25.000, del Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional, 1995.

La microcuenca de la quebrada Curucutí está enmarcada en un sector de tipo climático Bshi (Clima Tropical Estepario), según la clasificación de Köppen. De acuerdo con DATOS CLIMATOLÓGICOS del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Dirección de Hidrología y Meteorología (2000), la precipitación en la parte baja del área (franja costera) presenta montos pluviométricos anuales que oscilan entre 521,4 mm y 647,4 mm, y temperatura media anual de 26,0 ºC. Las formaciones vegetales que conviven en el área de la microcuenca de la quebrada Curucutí, desde la línea de costa hasta la parte más alta en el sector montañoso, son: vegetación litoral, cardonales y espinares, bosque deciduo, bosque semi-deciduo, bosque transicional, bosque de galería y vegetación secundaria (AMEND, 1991; PROYECTO ÁVILA; MAPA DE RIESGOS, 2002b; MONEDERO; GUTIÉRREZ, 2001; STEYERMARK; HUBER, 1978).

Con relación al uso actual de la tierra, los asentamientos humanos se concentran básicamente en la parte baja (abanico coluvio-aluvial) de la microcuenca, mientras que la parte alta (sector montañoso) con la mayor extensión superficial, corresponde a un Área Bajo Régimen de Administración Especial bajo la figura jurídica de Parque Nacional El Ávila. Las actividades económicas se concentran mayoritariamente en las ramas construcción, comercio, transporte y comunicaciones y administración pública (PLAN DE MANEJO PARA

LA ORDENACIÓN Y RESTAURACIÓN AMBIENTAL DEL EJE ARRECIFE – LOS CARACAS, 2003a, 2003b; MARCANO; BARRIOS, 2001).

MÉTODOS Y TÉCNICAS

La metodología desarrollada en este trabajo comprendió en primera instancia, las mediciones y cálculos de variables y parámetros morfométricos de la microcuenca y la red de drenaje (Tabla 1) de la quebrada Curucutí, para lo cual se utilizó como fuente de información planos topográficos del área de estudio a escala 1:5.000, correspondientes a las HOJAS B-42, C-42 y D-42 editadas por la Gobernación del Distrito Federal en el año 1984.

Tabla 1. Parámetros morfométricos medidos y calculados para la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, estado Vargas, Venezuela.

Variable	Parámetro	Símbolo	Ecuación	Dimensión
Escala de la cuenca	Área	A	-	L^2
	Perímetro	P	-	L
	Longitud	L	-	L
	Ancho	W	-	L
	Diámetro	D	$D = (4A/\pi)^{1/2}$	L
Gradiente y forma del relieve de la cuenca	Altura máxima	H	-	L
	Altura mínima	h	-	L
	Relieve máximo	H_b	$H_b = H - h$	L
	Radio del relieve	R	$R = H_b/L$	-
	Pendiente mediana	S_{md}	-	%
	Pendiente media del perfil longitudinal de la corriente principal	S_m	$S_m = (\Sigma \sqrt{S_{mi}}/m)^2$ S_{mi} [1] m [2]	%
Forma de la cuenca	Elongación	S_e	$S_e = A^{0,5}/L$	-
	Forma	R_f	$R_f = A/L^2$	-
	Coeficiente de compasidad	K_c	$K_c = P/A^{1/2}.0,28$	-
Extensión de la red de drenaje	Longitud de la corriente principal	L_{cp}	-	L
	Longitud total de las corrientes	C_t	$C_t = \Sigma$ longitud de las corrientes	L
	Densidad de drenaje	D_d	$D_d = C_t/A$	L/L^2
Orden y magnitud de la red de drenaje	Orden de la corriente	u	-	-
	Número de segmentos de la corriente de un orden dado	N_u	-	-
	Relación de bifurcación	R_b	$R_b = N_u/N_{u+1}$	-
	Longitud de la corriente de un orden dado	L_u	-	L
	Longitud total de las corrientes de un orden dado	L_{tu}	$L_{tu} = \Sigma L_u$	L
	Longitud media de las corrientes de un orden dado	L_{mu}	$L_{mu} = L_{tu}/N_u$	L
	Longitud media acumulada de las corrientes de un orden dado	L_{mau}	$L_{mau} = L_{mu} + L_{mu+1}$	L
	Relación de longitud	R_L	$R_L = L_{mu}/L_{mu-1}$	-
	Coeficiente de torrencialidad	CT	$CT = N_1/A$ N_1 [3]	-

Fuente: Gardiner, 1981; Gregory; Walling, 1973; Guevara; Cartaya, 1991; Henao, 1998; Horton, 1945; Leopold; Gordon; Miller, 1964; Monsalve, 2000; Pastrana, 2003; Pérez, 1977; Senciales, 1998; Smith; Stopp, 1978; Strahler, 1968; Strahler, 1985; Vélez; Vélez, s. f.a; Vélez; Vélez, s. f.b.

(1) S_{mi} = pendiente media de cada intervalo del perfil longitudinal de la corriente principal; (2) m = número de intervalos en que se divide el perfil longitudinal de la corriente principal; (3) N_1 = número de corrientes de orden 1.

Los tiempos de concentración de la microcuenca en su desembocadura y en el ápice del abanico, se estimaron con base en la ecuación de Kirpich (1940) $t_c = 0{,}01947\ L^{0,77}\ S^{-0,385}$ (L es la longitud del cauce principal, y S es la pendiente promedio del cauce principal).

Para la estimación de los caudales pico de crecientes, se tomó como información de entrada, los hietogramas de diseño para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50 100, 500 y 1000 años y duraciones de la lluvia a intervalos de 5 minutos durante 24 horas, estimados por Córdova y González (2003) y González y Córdova (2003) con información pluviográfica de la estación Maiquetía.

En primer lugar se calcularon los hietogramas de exceso de lluvia con base en el método del cálculo de la distribución temporal de las abstracciones o pérdidas por infiltración en una tormenta, desarrollado por el Soil Conservation Service (1972), el cual comprendió los siguientes pasos: (a) cálculo de la lluvia acumulada (P); (b) cálculo de la retención potencial máxima de agua (S) con la ecuación S = 1000 / CN – 10 (CN es el número adimensional de curva, el cual fue 55 para la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí); (c) cálculo de la abstracción inicial (I_a) mediante la ecuación $I_a = 0{,}2\ S$; (d) cálculo de las abstracciones continuadas (F_a) con la ecuación $F_a = S\ (P - I_a) / P - I_a + S$; (e) cálculo de los excesos de lluvia acumulada (P_e) por medio de la ecuación $P_e = P - I_a - F_a$; (f) cálculo de los hietogramas de exceso de lluvia (lluvia efectiva); y (g) finalmente cálculo de las intensidades de la lluvia efectiva.

La estimación propiamente dicha de los caudales pico de crecientes se llevó a cabo utilizando el método del Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico (HUIG), el cual comprendió los siguientes pasos: (a) cálculo del parámetro de onda cinemática (α_Ω) para la corriente de orden más alto por medio de la ecuación: $\alpha_\Omega = s_\Omega^{1/2} / n_\Omega\ b_\Omega^{2/3}$ (Ω es el orden más alto de la red de drenaje, s_Ω es la pendiente media de la corriente de orden más alto, n_Ω es el coeficiente de rugosidad del lecho de la corriente de orden más alto, y b_Ω es el ancho máximo del cauce de la corriente de orden más alto; (b) cálculo de la constante Π_i mediante la ecuación $\Pi_i = L_\Omega^{2,5} / i_e\ A_\Omega\ R_L\ \alpha_\Omega^{1,5}$ (L_Ω es la longitud de la corriente de orden más alto, i_e es la intensidad de la lluvia efectiva, A_Ω es el área de drenaje de la corriente de orden más alto y R_L es la relación de longitud media de la red de drenaje); (c) cálculo de los picos (q_p) y los tiempos al pico (t_p), con las ecuaciones $q_p = 0{,}871 / \Pi_i^{0,4}$ y $t_p = 0{,}585\ \Pi_i^{0,4}$ respectivamente; (d) cálculo de los caudales pico (Q_p) por medio de la ecuación $Q_p = 2{,}42\ (i_e\ A_\Omega\ t_e / \Pi_i^{0,4})\ (1 - 0{,}218\ t_e / \Pi_i^{0,4})$ (t_e es el tiempo de duración de la lluvia) (esta ecuación es solamente válida para tiempos de duración de la lluvia menores o iguales al tiempo de concentración de toda la cuenca); y finalmente (e) cálculo del tiempo de concentración (t_c) para cada uno de los intervalos de tiempo de duración de la lluvia según la ecuación $t_c = t_b = 2 / q_p = 2{,}30\ \Pi_i^{0,4}$.

RESULTADOS

Morfometría de la Microcuenca de Drenaje de la Quebrada Curucutí

La microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí corresponde a un sistema hidrogeomorfológico de pequeñas dimensiones de carácter exorreico con orientación norte – sur perpendicular a la línea de costa, cuyos parámetros morfométricos relacionados con el tamaño del sistema (área, perímetro, longitud, ancho y diámetro) (Tabla 2), determinan condiciones particulares que favorecen la ocurrencia de crecidas con hidrogramas de picos pronunciados y corta duración, y menores tiempos de concentración del sistema, en presencia de tormentas significativas en intensidad, duración y extensión.

Las alturas en el área están comprendidas desde los 125 msnm (altura mínima) que corresponde a la cota en la que se inicia el ápice del abanico, y 1425 msnm (altura máxima). La diferencia entre estas dos alturas extremas definen un relieve máximo de 1300 msnm

que sugiere alturas y pendientes significativas favorables a la génesis y activación de procesos erosivos y de transporte de materiales.

El radio del relieve (Tabla 2) indica que por cada kilómetro de longitud de la cuenca, existe un incremento promedio en altura de 270 m, lo cual es un valor significativo y de esperar para una microcuenca cuya mayor extensión se asienta sobre un relieve montañoso, por lo tanto el radio del relieve también es un indicador del incremento de las pendientes, y por ende del potencial erosivo en la microcuenca.

Tabla 2. Características morfométricas de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, estado Vargas, Venezuela.

Variable	Parámetro	Magnitud
Escala de la cuenca	Área	7,34 Km^2
	Perímetro	12,20 Km
	Longitud	4,80 Km
	Ancho	2,63 Km
	Diámetro	3,06 Km
Gradiente y forma del relieve de la cuenca	Altura máxima	1425 msnm
	Altura mínima	125 msnm
	Relieve máximo	1300 msnm
	Radio del relieve	0,27
	Pendiente mediana	21,50 %
	Pendiente media del perfil longitudinal de la corriente principal	0,18 (18 %)
Forma de la cuenca	Elongación	0,56
	Forma	0,32
	Coeficiente de compasidad	1,26
Extensión de la red de drenaje	Longitud de la corriente principal	5 Km
	Longitud total de las corrientes de la red de drenaje	59,67 Km
	Densidad de drenaje	8,13 Km/Km^2

La pendiente mediana (Tabla 2) indica que un 50 % del área posee vertientes y cauces con pendientes relativamente más fuertes y mayores alturas (sector montañoso) por encima de su valor, y en el otro 50 % se presentan pendientes relativamente más suaves y menores alturas (sector de abanico aluvial) por debajo de ella. Así mismo, implica la predominancia de procesos erosivos por encima del valor de la pendiente mediana, y de transporte y depositación por debajo de ella, con mayores velocidades del agua de escorrentía en el sector montañoso, que condicionan menores tiempos de concentración, y un alto potencial erosivo y de arrastre de sedimentos.

La quebrada Curucutí realiza un recorrido de 5 Km desde su naciente hasta su salida en el frente de montaña (ápice del abanico), a lo largo del cual describe un perfil longitudinal que exhibe fuertes cambios de pendiente y por ende de su gradiente hidráulico, arrojando una pendiente media de 18 %. La pendiente media de todo el perfil y el fuerte contraste de pendientes entre los segmentos en los que se dividió el perfil longitudinal de la quebrada, son indicadores de la alta probabilidad de esta quebrada a experimentar crecidas con hidrogramas de caudales picos elevados y de corta duración, altas velocidades del flujo, mayor capacidad de transporte de materiales y menores tiempos de concentración.

Los valores de elongación, forma y coeficiente de compasidad (Tabla 2), en conjunto, indican que la microcuenca presenta una forma alargada con tendencia a una configuración rectangular, lo cual es representativo de cuencas emplazadas en relieves montañosos. Esto implica bajas probabilidades de experimentar frecuentes crecidas, debido a que su forma no permite exponer toda su superficie al radio de acción de una determinada tormenta.

Sin embargo, estas afirmaciones son relativas, ya que depende del tamaño o extensión de la tormenta, de la duración e intensidad de la misma, y de las magnitudes extremas del fenómeno. De cualquier modo la probabilidad de que se presenten crecidas con hidrogramas de picos pronunciados y de corta duración, es alta, aunado a las características del relieve ya discutidas, que contribuyen en gran medida a este comportamiento hidrológico e hidráulico.

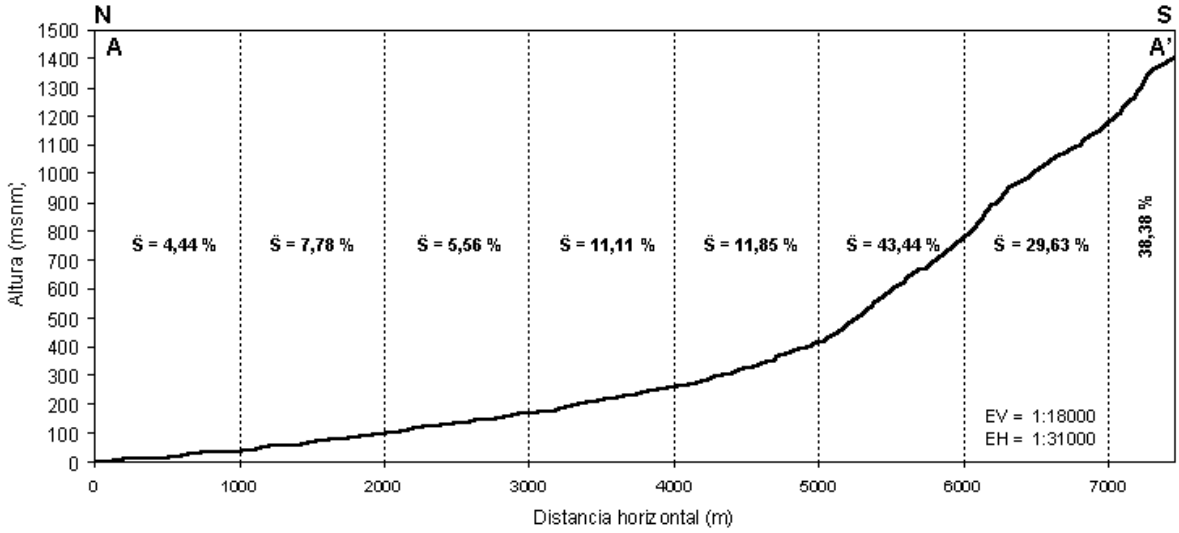


Figura 2. Perfil longitudinal del cauce de la quebrada Curucutí (vista de oeste a este), estado Vargas, Venezuela.

La red de drenaje de la microcuenca de la quebrada Curucutí está constituida por cauces o corrientes de agua de cortos recorridos y régimen intermitente, que en conjunto tienen una longitud total de 59,67 Km y muestran un patrón de drenaje de tipo subdendrítico (Figura 3). La densidad de drenaje presenta un valor medio (Tabla 2) con una textura media (Figura 3), lo cual indica que la mayor parte de la superficie experimenta escorrentía concentrada, por lo que es de suponer una alta tasa de erodabilidad en toda su extensión, inestabilidad morfogenética y por ende gastos sólidos significativos, en presencia de tormentas de lluvias de alta intensidad y duración. Este valor también indica que en el sistema se generan crecidas con hidrogramas de picos elevados y reducidos tiempos de concentración.

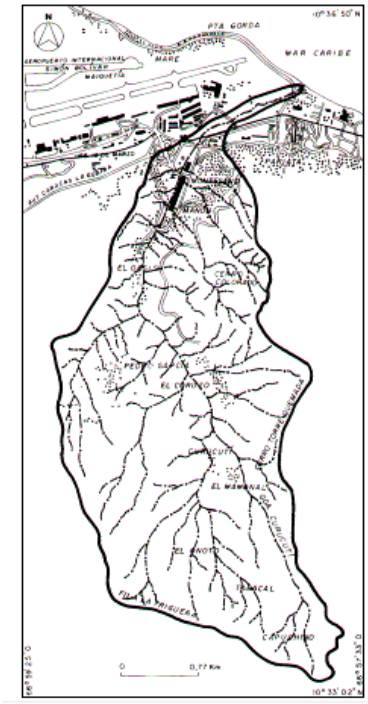


Figura 3. Red de drenaje de la microcuenca de la quebrada Curucutí, estado Vargas, Venezuela.

Del análisis de ordenamiento y jerarquización de las corrientes de agua que conforman la red de drenaje, se obtuvo que la misma corresponde a un sistema hidrogeomorfológico de orden 5 (Tabla 3), siendo esta magnitud de cierta manera, un indicador importante de la extensión y ramificación de la red de drenaje, considerando la pequeña superficie del sistema, así como de alta probabilidad a experimentar crecidas con hidrogramas de picos significativos.

Tabla 3. Orden y magnitud de las corrientes de la red de drenaje de la microcuenca de la quebrada Curucutí, estado Vargas, Venezuela.

Orden de la corriente	Número de corrientes	Relación de bifurcación	Longitud total de las corrientes (Km)	Longitud media de las corrientes (Km)	Longitud media acumulada de las corrientes (Km)	Relación de longitud
1	164		35,90	0,22	0,22	
2	39	4,21	13,82	0,35	0,57	1,62
3	9	4,33	4,17	0,46	1,04	1,31
4	2	4,50	3,20	1,60	2,64	3,45
5	1	2,00	2,30	2,30	4,94	1,44

Coeficiente de torrencialidad =	22,34

Los cursos de agua de la red son de cortos recorridos con valores promedios por orden que oscilan entre 0,22 Km (corrientes de orden 1) y 2,30 Km (corriente de orden 5) (Tabla 3). El 76,28 % de las corrientes son de orden 1, lo cual influye significativamente en la reducción de los tiempos de concentración de la microcuenca en presencia de tormentas. La corriente principal de la red correspondiente a la quebrada Curucutí, alcanza su orden 5 aproximadamente a 350 msnm y a una distancia de 2,30 Km de su salida en el frente de montaña, lo que significa que en presencia de una crecida, ésta alcanza caudales picos importantes desde su curso medio encajado en un cañón montañoso. El coeficiente de torrencialidad muestra un valor bastante alto (Tabla 3), lo cual indica una elevada susceptibilidad a la erosión lineal, así como tiempos de concentración o de respuesta de la microcuenca muy cortos.

La relación de bifurcación entre los distintos órdenes de corrientes de la red de drenaje es bastante uniforme en todo el sistema y se ubican dentro del rango (3-5) de valores característicos de los sistemas fluviales, a excepción de la relación entre los órdenes 4 y 5 cuyo valor es 2 (Tabla 3). La relación de bifurcación media del sistema es de 3,73 (Figura 4). Este valor corrobora la alta probabilidad de experimentar crecidas con caudales pico importantes.

Tiempos de Concentración de la Microcuenca de Drenaje de la Quebrada Curucutí

Los tiempos de concentración calculados para la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, se muestran en la Tabla 4. Estos valores corroboran las afirmaciones que sobre este parámetro se realizaron, a partir del análisis de las características morfométricas de la

microcuenca de drenaje, a la vez que tales magnitudes tienen correspondencia con la morfología y la geometría del sistema hidrológico de interés en este estudio.

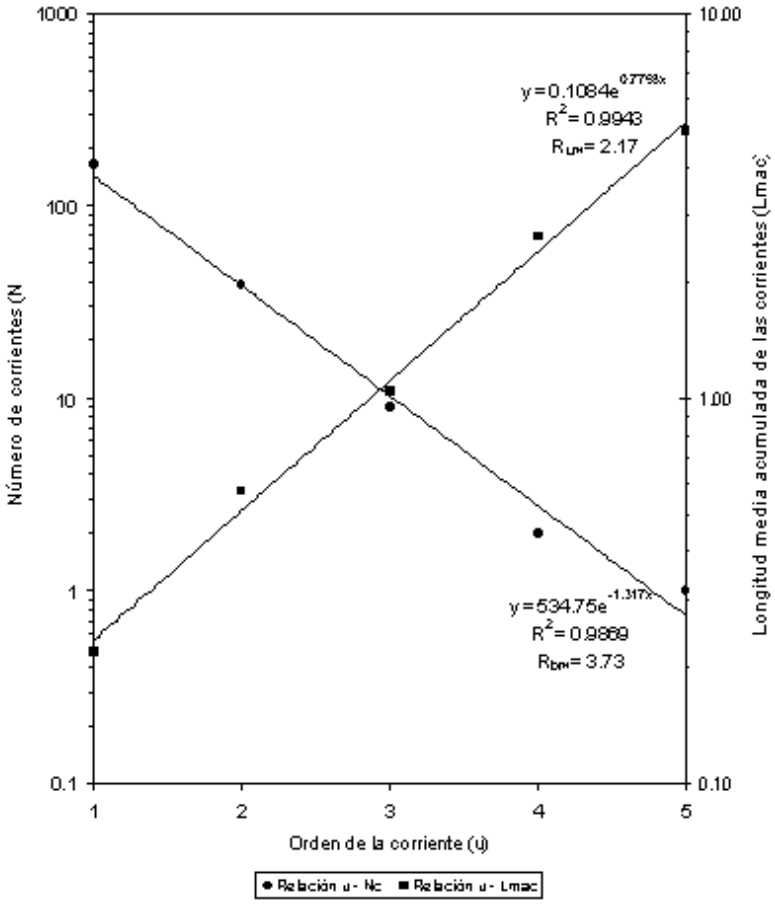


Figura 4. Relación del orden de las corrientes con el número de corrientes, y la longitud media acumulada de las corrientes de la red de drenaje de la microcuenca de la quebrada Curucutí, estado Vargas, Venezuela

Tabla 4. Tiempo de concentración de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, estado Vargas, Venezuela.

Posición geomorfológica	Magnitudes empleadas en los cálculos		Tiempo de concentración	
	Longitud del cauce principal (m)	Pendiente promedio del cauce principal (m/m)	h	min
Desembocadura de la quebrada Curucutí en el mar (0 msnm)	8000	0,175	0,64	38,56
Ápice del abanico aluvial (125 msnm)	5000	0,248	0,39	23,48

Los tiempos de concentración estimados son bastante cortos, correspondiéndose con valores críticos que suponen el tiempo de arribo de una crecida a las secciones de

referencia, principalmente en el ápice del abanico (125 msnm), a partir del cual hacia la línea de costa y bordeando el cauce principal de la quebrada Curucutí sobre los depósitos torrenciales del abanico aluvial, se asienta gran parte de la infraestructura y población de las Parroquias Maiquetía y Carlos Soublette del estado Vargas.

Caudales Pico de Crecientes de la Microcuenca de Drenaje de la Quebrada Curucutí

Para la estimación de los caudales pico de crecientes y de los hidrogramas unitarios, tal como ya se explicó, se requirió en primer lugar calcular los hietogramas de exceso de lluvia para los distintos períodos de retorno considerados en el análisis, y duraciones de la lluvia a intervalos de 5 minutos durante 24 horas, a partir de los hietogramas de lluvias de diseño. Posteriormente, se calcularon las intensidades efectivas de las lluvias máximas anuales; y finalmente, se estimaron los hidrogramas unitarios y caudales pico de crecientes, por medio del modelo del HUIG.

Con relación a los hietogramas de exceso de lluvia se puede apreciar que para lluvias de diseño de 24 horas a intervalos de 5 minutos, los excesos máximos de lluvia se ubican a las 12 horas (720 min) de duración (Figura 5), con valores que abarcan desde 0 pulg (0 mm) para un período de retorno de 2,33 años, hasta 0,67 pulg (17,02 mm) para un período de retorno de 1000 años. Los excesos diferentes de 0 mm para el período de retorno de 2,33 años, se ubican entre duraciones de la lluvia que abarcan desde 12,08 horas (725 min) hasta 12,58 horas (755 min), con un valor uniforme de 0,01 pulg (0,25 mm).

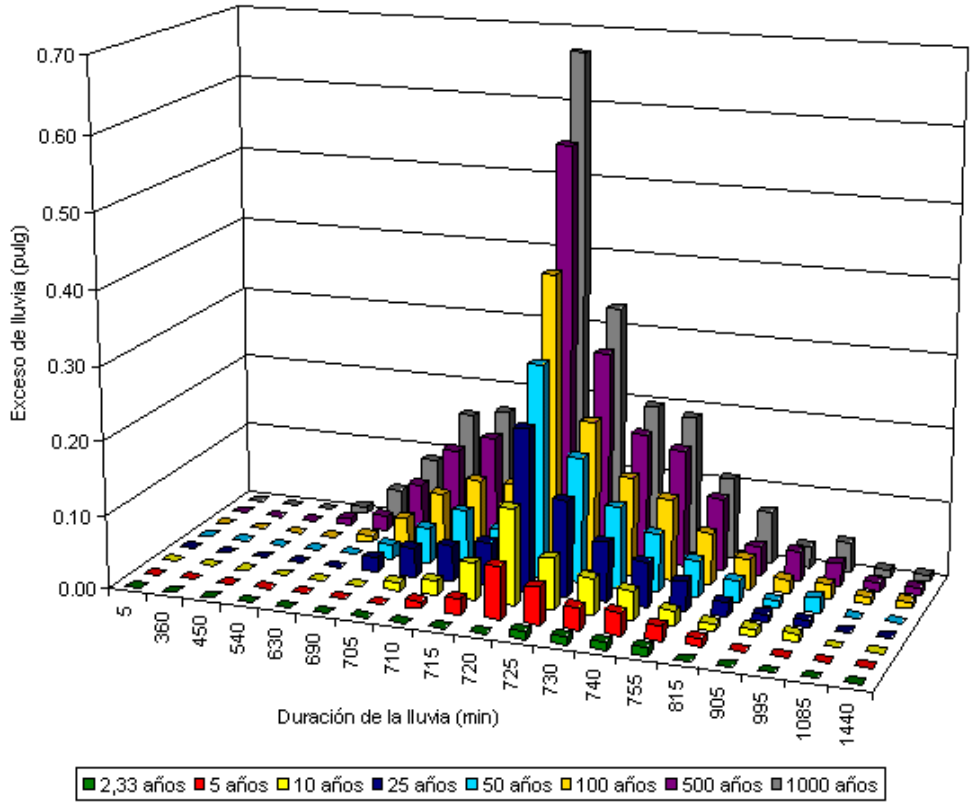
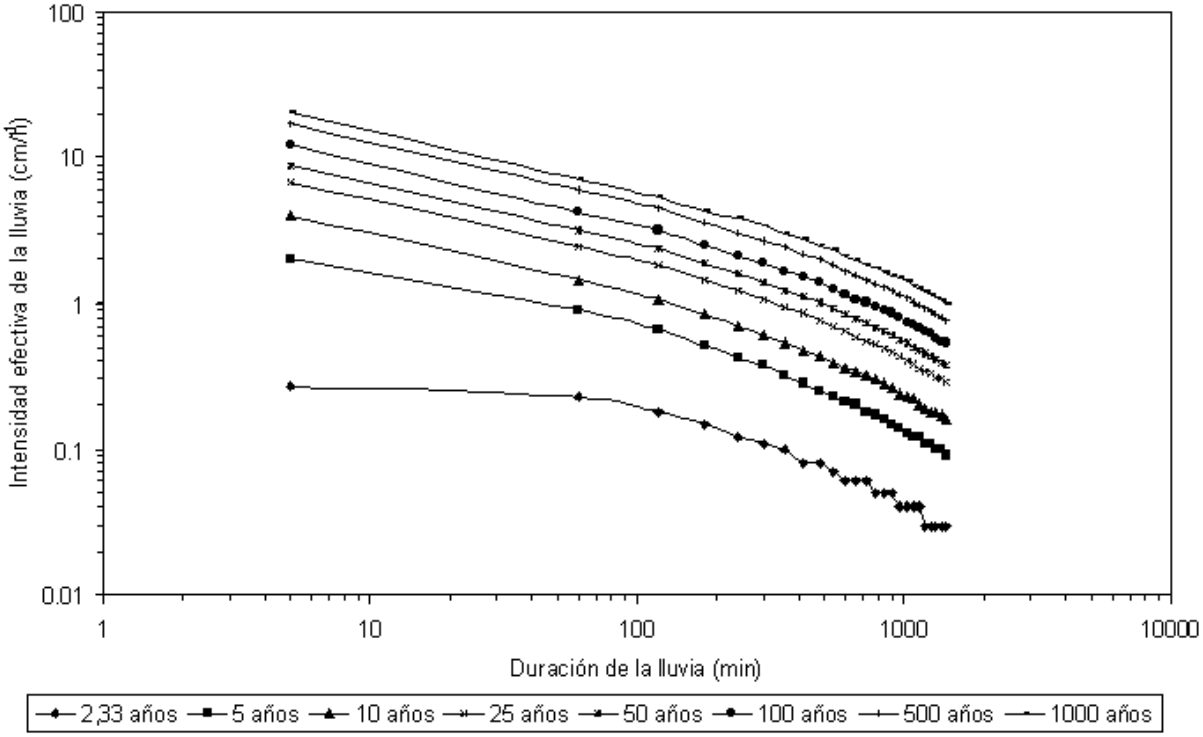


Figura 5. Hietogramas de exceso de lluvia de la estación pluviográfica Maiquetía, estado Vargas, Venezuela.

Para escenarios críticos de crecidas e inundaciones, se pueden observar valores de exceso de lluvia (12 horas) de 0,29 pulg (7,37 mm), 0,40 pulg (10,16 mm) y 0,56 pulg (14,22 mm), correspondientes a períodos de retorno de 50, 100 y 500 años respectivamente, y en el peor de los casos de 0,67 pulg (17,02 mm) para 1000 años de período de retorno.

Con relación a las intensidades efectivas de las lluvias máximas anuales, se obtuvo que para duraciones de la lluvia de 1 hora, las intensidades efectivas de las lluvias máximas



anuales comprenden desde 0,23 cm/h^{-1} (2,30 mm/h) para un período de retorno de 2,33 años, hasta 7,08 cm/h^{-1} (70,80 mm/h) para un período de retorno de 1000 años (Figura 6). Para escenarios críticos de crecidas e inundaciones de 50, 100, 500 y 1000 años de período de retorno con esa duración (1 hora), las intensidades corresponden a valores de 3,19 cm/h^{-1} (31,90 mm/h), 4,18 cm/h^{-1} (41,80 mm/h), 5,91 cm/h^{-1} (59,10 mm/h) y 7,08 cm/h^{-1} (70,80 mm/h) respectivamente (Figura 6).

Figura 6. Curvas de intensidad efectiva – duración –frecuencia de la lluvia de la estación pluviográfica Maiquetía, estado Vargas, Venezuela.

Sin embargo, los montos de las intensidades efectivas más críticas se registran en los primeros 5 minutos de duración de la lluvia, cuyos valores oscilan entre 0,27 cm/h^{-1} (2,70 mm/h) para un período de retorno de 2,33 años y 20,33 cm/h^{-1} (203,30 mm/h) para un período de retorno de 1000 años, y con valores de 8,81 cm/h^{-1} (88,10 mm/h), 12,10 cm/h^{-1} (121 mm/h) y 16,98 cm/h^{-1} (169,80 mm/h) para escenarios críticos de crecidas e inundaciones de 50, 100 y 500 años de período de retorno respectivamente (Figura 6).

Los parámetros morfométricos e hidráulicos requeridos para la estimación de los caudales pico de crecientes y de los hidrogramas unitarios en la sección hidráulica de interés (ápice del abanico), a través del modelo del HUIG, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros morfométricos de la microcuenca de drenaje e hidráulicos en la sección de interés (ápice del abanico), utilizados en la estimación de los caudales pico de crecientes de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, estado Vargas, Venezuela.

	Parámetro	Símbolo	Magnitud
Morfom	Área	A	7,34 Km^2
	Pendiente media de la corriente de orden más alto	S_m	0,07 (7%)

	Longitud total de la corriente de orden más alto	Lc_4	4,7 Km
	Relación de longitud	R_L	2,17
Hidráulico	Ancho máximo del cauce de la corriente de orden más alto	b	13 m
	Coeficiente de rugosidad (n de Manning) del lecho de la corriente de orden más alto	n	0,030

En la Tabla 6 se presenta una síntesis en la que se relacionan los caudales pico de crecientes, y los picos y tiempos al pico de los hidrogramas unitarios correspondientes a los distintos períodos de retorno de interés, con las respectivas duraciones de la lluvia en la que éstos fueron observados, exceso de lluvia, exceso de lluvia acumulado e intensidad efectiva.

Tabla 6. Hidrogramas unitarios y caudales pico de crecientes de distintos períodos de retorno de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, estado Vargas, Venezuela.

Período de retorno (Tr) (años)	Duración de la lluvia (T) en la que se observó el caudal pico (min)	Exceso de lluvia (cm)	Exceso de lluvia acumulado (cm)	Intensidad efectiva (cm/h^{-1})	Pico (q_p) (h^{-1})	Tiempo al pico (t_p) (h)	Caudal pico (Q_p) (m^3/s^{-1})
2,33	85	0,01	0,31	0,22	0,40	1,27	0,81
5	80	0,05	1,08	0,81	0,68	0,75	8,33
10	40	0,10	1,21	1,82	0,94	0,54	21,43
25	45	0,14	2,12	2,83	1,12	0,45	52,16
50	40	0,21	2,62	3,93	1,28	0,40	85,61
100	45	0,27	3,60	4,80	1,38	0,37	134,96
500	60	0,30	5,91	5,91	1,50	0,34	245,14
1000	60	0,38	7,08	7,08	1,62	0,31	339,36

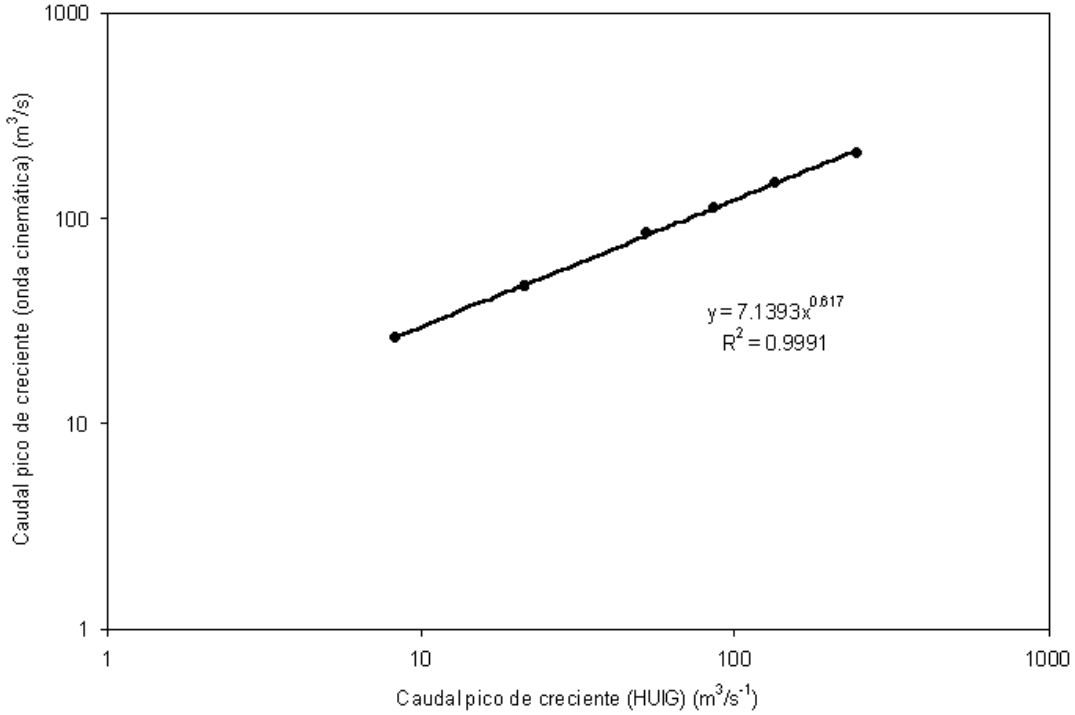
Con ello se confirma, que en la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, las crecientes (respuesta hidrológica) con sus picos máximos son producidas y/o controladas por lluvias máximas, con duraciones menores, iguales y ligeramente superiores a 1 hora, aunado a las características morfométricas del sistema y los cortos tiempos de concentración, que favorecen la generación de hidrogramas con picos pronunciados de magnitudes importantes y corta duración (tiempo base), así como reducidos tiempos de retardo del sistema.

Al comparar y correlacionar las magnitudes de los caudales pico de crecientes obtenidas en este estudio, para la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, a través del modelo del HUIG, con las obtenidas por González y Córdova (2003), a través del modelo de la onda cinemática, para la misma microcuenca (Tabla 9), se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,98 y un coeficiente de determinación de 0,99 (Figura 7), con lo cual se puede afirmar, que la calibración del modelo del HUIG en la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, para la estimación de sus caudales pico de crecientes, estuvo bastante ajustada.

Tabla 9. Comparación de los caudales pico de crecientes obtenidos por el modelo del HUIG con los obtenidos por otros autores por el modelo de onda cinemática, en la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, estado Vargas, Venezuela.

Período de retorno (tr) (años)	Caudales pico de crecientes	
	HUIG (m^3/s^{-1})	Onda cinemática[1] (m^3/s)
2,33	0,81	-
5	8,33	26
10	21,43	47
25	52,16	85

50	85,61	112
100	134,96	148
500	245,14	207
1000	339,36	-
	Coeficiente de correlación =	0,98



(1) Fuente: González; Córdova, 2003.

Figura 7. Correlación entre los caudales pico de crecientes obtenidos por el modelo del Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico (HUIG) y los obtenidos por el modelo de onda cinemática, en la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, estado Vargas, Venezuela.

CONCLUSIONES

La microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, es un sistema hidrogeomorfológico cuyas respuestas morfodinámica e hidrológica están determinadas por la pequeña área del mismo, fuertes pendientes en las vertientes y cauces del sector montañoso, la densidad de drenaje media, el orden 5 de la microcuenca, una relación de bifurcación media de 3,73, alta torrencialidad, las dimensiones de las tormentas y la intensidad y duración de las lluvias. En breves palabras, las respuestas morfodinámica e hidrológica de la microcuenca, son condicionadas y controladas por las características morfométricas del sistema y de su red de drenaje.

Los tiempos de concentración estimados son bastante cortos, a la vez que representan valores críticos como tiempo de respuesta hidrológica (crecidas) de la microcuenca, considerando los asentamientos humanos emplazados sobre el área del abanico aluvial. Estos valores de tiempo de concentración, corroboran el control de la morfometría del sistema y de su red de drenaje, en la magnitud de los mismos.

La comprensión de la influencia y/o control de cada parámetro morfométrico en la respuesta hidrológica de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, permite inferir de manera preliminar las características de dicha respuesta, sobre todo, esto cobra gran valor para

aquellas cuencas en las que la información hidrológica (caudales y precipitación) es escasa o inexistente.

La determinación, así como el conocimiento y análisis de la morfometría de esta microcuenca, ayuda a comprender con más detalle, la alta probabilidad de ocurrencia de inundaciones en la parte baja del área, así como la génesis de fenómenos de remoción en masa en vertientes y aludes torrenciales.

Los caudales pico de las crecientes en la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí para los distintos períodos de retorno considerados en el estudio, son controladas y/o determinadas por láminas de lluvias máximas con duraciones menores, iguales y ligeramente superiores a 1 hora (máximo 85 minutos). Ello definen escenarios críticos de inundaciones, para eventos de períodos de retorno de 50, 100 y 500 años principalmente, y en el peor de los casos de 1000 años, cuyas respuestas hidrológicas son rápidas y violentas.

Este análisis hidrogeomorfológico aporta elementos de gran importancia y peso para la concepción y/o reevaluación de ser el caso, del diseño hidráulico e hidrológico de estructuras para el control de crecientes y de sedimentos, así como para el análisis, evaluación y zonificación de la amenaza por inundaciones, movimientos en masa y aludes torrenciales, y el diseño de sistemas de alertas tempranas.

REFERENCIAS

ALONSO, F; OTROS. **Prácticas de Geografía Física** (Colección Prácticas de Geografía). Barcelona: Oikos-Tau, 1981. 205 p.

AMEND, S. **Parque Nacional El Ávila** (Parques Nacionales y Conservación Ambiental Nº 2). Caracas: Editora Stephan y Thora Amend, 1991. 176 p.

CARACAS, hoja 6847-IV-SO. Caracas: Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional, 1995a. 1 ortofotomapa. Escala: 1:25.000.

PLAN DE MANEJO PARA LA ORDENACIÓN Y RESTAURACIÓN AMBIENTAL DEL EJE ARRECIFE – LOS CARACAS. Maiquetía: Autoridad Única de Área para el Estado Vargas; Ecology and Environment, 2003a. Mapa 5.2, Cobertura Vegetal y Uso de la Tierra. Escala: 1:25.000.

PLAN DE MANEJO PARA LA ORDENACIÓN Y RESTAURACIÓN AMBIENTAL DEL EJE ARRECIFE – LOS CARACAS. Maiquetía: Autoridad Única de Área para el Estado Vargas; Ecology and Environment, 2003b. Mapa 9.1, Uso Actual. Escala: 1:25.000.

CÓRDOVA, J.; RODRÍGUEZ, I. Geomorphoclimatic estimation of extreme flow probabilities. **Journal of Hydrology,** Amsterdam, volumen (v. 65), p. 159-173, 1983.

CÓRDOVA, J.; GONZÁLEZ, M. Estimación de los volúmenes y caudales máximos que produjeron los aludes torrenciales ocurridos en Diciembre de 1999 en cuencas del Litoral Central del estado Vargas, Venezuela. **Acta Científica Venezolana,** Caracas, volumen (v. 54), número (n. 1), p. 33-48, 2003.

DATOS CLIMATOLÓGICOS: Estaciones Maiquetía, Maiquetía – Aeropuerto y Los Castillitos. Caracas: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales; Dirección de Hidrología y Meteorología, 2000. Datos no publicados.

GARDINER, V. Drainage basin morphometry. En: GOUDIE, A. (Ed.). **Geomorphological Techniques.** Londres: George Allen & Unwin, 1981. p. 47-55.

GONZÁLEZ, M; CÓRDOVA, J. Estimación de hidrogramas de crecidas en cuencas del Litoral Central luego de los aludes torrenciales de Diciembre de 1999. **Acta Científica Venezolana,** Caracas, volumen (v. 54), número (n. 1), p. 63-87, 2003.

GREGORY, K.; WALLING, D. **Drainage basin form and process: A geomorphological approach.** Londres: Edward Arnold, 1973. 456 p.

GUEVARA, E; CARTAYA, H. **Hidrología: Una introducción a la ciencia hidrológica aplicada.** Valencia: GUECA, 1991. 358 p.

HENAO, J. **Introducción al manejo de cuencas hidrográficas.** Santafé de Bogotá: Universidad Santo Tomás, 1998. 396 p.

HOJA B-42. Caracas: Gobernación del Distrito Federal, 1984a. 1 mapa. Escala: 1:5.000.

HOJA C-42. Caracas: Gobernación del Distrito Federal, 1984b. 1 mapa. Escala: 1:5.000.

HOJA D-42. Caracas: Gobernación del Distrito Federal, 1984c. 1 mapa. Escala: 1:5.000.

HORTON, R. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin,** volumen (v. 56), p. 275-370, 1945.

KIRPICH, Z. Time of concentration of small agricultural watersheds. **Civil Engineering,** volumen (v. 10), número (n. 06), p. 362, 1940.

LA GUAIRA, hoja 6847-IV-NO. Caracas: Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional, 1995b. 1 ortofotomapa. Escala: 1:25.000.

LEOPOLD, L.; GORDON, M.; MILLER, J. **Fluvial processes in Geomorphology.** San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1964, 872 p.

MAIQUETÍA, hoja 6847-IV-NO. Caracas: Dirección de Cartografía Nacional, 1979b. 1 mapa. Escala: 1:25.000.

MARCANO, F.; BARRIOS, S. **Estado Vargas: Aspectos socioeconómicos, función urbana y opciones de desarrollo, Litoral Vargas: Corredor urbano y red vial estructurante.** Caracas: Instituto de Urbanismo, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela, Centro de Estudios del Desarrollo, 2001, 287.

MONEDERO, C.; GUTIÉRREZ, M. Análisis cuantitativo de los patrones espaciales de la cobertura vegetal en el geosistema montañoso tropical El Ávila. **Ecotrópicos,** Mérida, volumen (v. 14), número (n. 1), p. 19-30, 2001.

MONSALVE, G. **Hidrología en la Ingeniería.** Santafé de Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. 382 P.

PASTRANA, S. 2003. **Análisis topológico de cuencas.** [On line] http://club.telepolis.com/geografo/geomorfologia/analcuen.htm

PÉREZ, D. **Fundamentos de geomorfología dinámica con énfasis en los procesos fluviales.** Caracas: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Dirección General de Información e Investigación del Ambiente, Dirección de Hidrología, 1977, 70 p.

PROYECTO ÁVILA; MAPA DE RIESGOS. Caracas: Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar; Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, 2002a. Mapa de pendientes. Escala: 1:25.000.

PROYECTO ÁVILA; MAPA DE RIESGOS. Caracas: Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar; Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, 2002b. Mapa de vegetación. Escala: 1:25.000.

RODRÍGUEZ, I.; DEVOTO, G.; VALDÉS, J. Discharge Response Analysis and Hydrologic Similarity: The Interrelation Between the Geomorphologic IUH and Storm Characteristics. **Water Resources Research,** Amsterdam, volumen (v. 15), número (n. 6), p. 1435-1444, 1979.

RODRÍGUEZ, I.; GONZÁLEZ, M. A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph. **Water Resources Research,** Amsterdam, volumen (v. 18), número (n. 4), p. 877-886, 1982.

RODRÍGUEZ, I.; GONZÁLEZ, M; CAAMAÑO, G. On the climatic dependence of the IUH: A rainfall – runoff analysis of the Nash Model and the geomorphoclimatic theory. **Water Resources Research,** Amsterdam, volumen (v. 18), número (n. 4), p. 887-903, 1982.

RODRÍGUEZ, I.; VALDÉS, J. The Geomophologic Structure of Hydrologic Response. **Water Resources Research,** Amsterdam, volumen (v. 15), número (n. 6), p. 1409-1420, 1979.

SENCIALES, J. El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico. **Norba,** volumen (v. X), p. 155-183, 1998.

SMITH, D.; STOPP, P. **The river basin: An introduction to the study of hydrology.** Cambridge: Cambridge University Press, 1978. 273 p.

SOIL CONSERVATION SERVICE. Hydrology. En: **National Engineering Handbook** (Sección 4). Washington: Department of Agriculture, 1972.

STEYERMARK, J.; HUBER, O. **Flora del Ávila: Flora y vegetación de las montañas del Ávila, de la Silla y del Naiguatá.** Caracas: Sociedad Venezolana de Ciencias Naturales, Völlmer Foundation, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, 1978. 655 p.

STRAHLER, A. Quantitative Geomorphology. En: FAIRBRIDGE, R. (Ed.). **The Encyclopedia of Geomorphology** (Encyclopedia of Earth Sciences Series, T. 3). Pennsylvania: Dowden, Hutchinson & Ross, 1968. p. 898-912.

STRAHLER, A. **Geografía Física.** 7. ed. Barcelona: Omega, S. A., 1984. 550 p.

URBANI, F. Geología del área de la autopista y carretera vieja Caracas – La Guaira, Distrito Capital y estado Vargas: Guía de excursión. **Geos**, Caracas, número (n. 35), p.27-41, 2002.

URBANI, F.; RODRÍGUEZ, J.; VIVAS, V. Geología del estado Vargas, Venezuela. EN: MEMORIAS DEL SEMINARIO INTERNACIONAL LOS ALUDES TORRENCIALES DE DICIEMBRE 1999 EN VENEZUELA, 1, Caracas. Caracas: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de Fluídos, 2000. CD-ROM.

VALDÉS, J.; FIALLO, Y.; RODRÍGUEZ, I. A Rainfall-Runoff Analysis of the Geomorphologic IUH. **Water Resources Research,** Amsterdam, volumen (v. 15), número (n. 6), p. 1421-1434, 1979.

23 de Enero, hoja 6847-IV-SO. Caracas: Dirección de Cartografía Nacional, 1979a. 1 mapa. Escala: 1:25.000.

VÉLEZ, M.; VÉLEZ, J. Geomorfología de cuencas. En: VÉLEZ, M.; VÉLEZ, J. (Eds.). **Hidrología (I-1060): Notas del curso de Hidrología de la profesora María Victoria Vélez O.** Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Sede Medellín, Unidad de Hidráulica, s. f.a. [On line] http://poseidon.unalmed.edu.co/Materias/hidrología/4_Geomorfologia.pdf

VÉLEZ, M.; VÉLEZ, J. La cuenca hidrográfica. En: VÉLEZ, M.; VÉLEZ, J. (Eds.). **Hidrología (I-1060): Notas del curso de Hidrología de la profesora María Victoria Vélez O.** Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Sede Medellín, Unidad de Hidráulica, s. f.b. [On line] http://poseidon.unalmed.edu.co/Materias/jivelez/morfometría_cuenca. doc